

ЭПТ 2015



ACED 2015

УДК 621.3.016.2

3.5. АНАЛИЗ МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ ТРЕХФАЗНОЙ ЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ В ГИПЕРКОМПЛЕКСНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

INSTANTANEOUS POWER ANALYSIS OF THREE-PHASE LINEAR LOAD IN THE HYPER-COMPLEX SPACE

Нос Олег Викторович, канд. техн. наук, доцент каф. «Проектирование технологических машин» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: nos@corp.nstu.ru. Тел.: +7-(383)-3461177

Oleg V. Nos, Cand. Sc., Associate professor at the department of technology machines design, Novosibirsk state technical university, 630073, Karl Marx Av., 20, Novosibirsk, Russian Federation. E-mail: nos@corp.nstu.ru. Ph.: +7-(383)-3461177

Аннотация: В настоящее время при решении прикладных задач повышения энергоэффективности трехфазных систем переменного тока общего назначения широко используются активные силовые фильтры, предназначенные для симметрирования нагрузки, подавления высокочастотных гармоник, уменьшения скачков напряжения и т.д. Алгоритмы управления данными силовыми полупроводниковыми устройствами реализуются в рамках геометрического, тензорного и алгебраического подходов, причем в последнем случае, основанном на использовании гиперкомплексных чисел, удастся несколько упростить структуру управляющей части. Данный доклад посвящен анализу кватерниона мгновенной мощности применительно к несимметричным активно-реактивным цепям с целью определения его неактивных составляющих, подлежащих последующему исключению из общего потока электрической энергии в единицу времени.

Abstract: At present time in order to improve the power quality of AC three-phase systems the active power filters are used for load balancing, harmonic filtering, voltage flicker reduction etc. Control strategies for power semiconductor converters in these applications are implemented using the geometrical, tensor or algebraic approaches. With the last one it becomes possible to reduce the control block structure. This paper deals with an instantaneous power quaternion of unbalanced linear three-phase loads for obtaining information about the inactive component which is to be excluded from the AC electrical energy flows per unit of time.

Ключевые слова: активный силовой фильтр; несимметричная трехфазная нагрузка; кватернион мгновенной мощности.

Key words: active power filter; unbalanced three-phase load; instantaneous power quaternion.

ВВЕДЕНИЕ

При практической реализации комплекса мер по ресурсу и энергосбережению широко используется регулируемый электропривод с полупроводниковыми преобразователями, вызывающими в силу дискретного характера работы искажения в гармонической форме электрических сигналов с одновременной неравномерной загрузкой подводящих распределительных линий. Традиционный подход к снижению влияния устройств силовой электроники на качество электрической энергии основывается на применении пассивных RLC-фильтров соответствующего порядка [1, 2], эффективность которых во многом определяется температурным дрейфом параметров и текущей конфигурацией питающей сети [3]. Помимо этого активно-реактивные корректирующие цепи имеют большие массогабаритные показатели, функционируют только в ограниченном спектре

частот и могут вызывать резко колебательные процессы в энергосистеме. По этим причинам за рубежом в широком диапазоне мощностей до 60 МВА применяются активные силовые фильтры (АСФ), которые предназначены для исключения высокочастотных гармоник, коррекции углового сдвига, демпфирования резонансных явлений и т.д. [4, 5].

Принцип действия полупроводниковых преобразовательных устройств активной фильтрации основан на преднамеренной генерации в трехфазную систему компенсационных воздействий сложной периодической формы, благодаря которым обеспечивается гармонический закон изменения потребляемых от сети токов в совокупности с единичным или опережающим коэффициентом мощности вне зависимости от типа нагрузки, что особенно актуально для случая существенно

нелинейного энергопотребления, к классу которого относятся частотно-регулируемые электроприводы переменного тока. Помимо этого, к основным достоинствам АСФ также можно отнести низкий уровень собственных активных потерь, автоматическую подстройку к изменяющимся режимам работы сети, а также отсутствие жестких требований к качественному составу электрической энергии, что полностью снимает какие-либо ограничения по области практического применения.

В настоящее время существуют несколько основных подходов к формированию компенсационных воздействий, которые основываются на представлении токов и напряжений в виде пространственных векторов [6], тензоров [7] или гиперкомплексных чисел [8], причем в последнем случае удается упростить структуру системы управления АСФ за счет снижения общего количества выполняемых математических операций [2, 9]. В данном докладе представлены результаты аналитического исследования уравнения баланса мгновенных мощностей произвольной несимметричной RLC-нагрузки в гиперкомплексном пространстве, на основании которого в работе сформулированы общие требования к составу исключаемых при помощи АСФ неэффективных составляющих общего потока электрической энергии в единицу времени.

КВАТЕРНИОН МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ

При алгебраическом подходе к математическому описанию процесса энергопотребления, фазные переменные задаются в форме кватерниона без скалярной части [2, 4, 5, 9, 10]

$$\mathbf{X}_{ABC} = x_A \circ \mathbf{q}_1 + x_B \circ \mathbf{q}_2 + x_C \circ \mathbf{q}_3,$$

здесь x_A, x_B, x_C – мгновенные значения электрических величин; $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3$ – мнимые единицы, являющиеся ортонормированными базисными векторами в четырехмерном гиперкомплексном пространстве [4, 9], в результате чего кватернион мгновенной мощности определяется в соответствии с формулой

$$\mathbf{P}_{ABC} = \mathbf{U}_{ABC} \circ \mathbf{I}_{ABC} = \text{scalP}_{ABC} + \text{vectP}_{ABC}, \quad (1)$$

где $\text{scalP}_{ABC}, \text{vectP}_{ABC}$ – скалярная (вещественная) и векторная (мнимая) части \mathbf{P}_{ABC}

$$\text{scalP}_{ABC} = -(u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C), \quad (2)$$

$$\text{vectP}_{ABC} = q_A \circ \mathbf{q}_1 + q_B \circ \mathbf{q}_2 + q_C \circ \mathbf{q}_3, \quad (3)$$

здесь P_{ABC}, q_A, q_B, q_C – вещественные коэффициенты, определяемые как

$$q_A = u_B i_C - u_C i_B, \quad q_B = u_C i_A - u_A i_C, \\ q_C = u_A i_B - u_B i_A.$$

НЕСИММЕТРИЧНАЯ ЛИНЕЙНАЯ НАГРУЗКА

Воспользовавшись методом симметричных составляющих [1, 11], выполним анализ правой части уравнения (1) применительно к линейному потребителю электрической энергии с гармонической системой напряжений

$$\begin{cases} u_A = u_m \cos \omega t, \\ u_B = u_m \cos(\omega t - 120^\circ), \\ u_C = u_m \cos(\omega t + 120^\circ), \end{cases} \quad (4)$$

где u_m – амплитуда гармонического сигнала с угловой частотой $\omega = 100\pi \text{ с}^{-1}$,

в которой присутствует только прямая последовательность фаз [10]

$$u_+ = u_m \cos \omega t \quad (5)$$

и синусоидальными токами

$$\begin{cases} i_A = i_{mA} \cos(\omega t + \varphi_A), \\ i_B = i_{mB} \cos(\omega t - 120^\circ + \varphi_B), \\ i_C = i_{mC} \cos(\omega t + 120^\circ + \varphi_C), \end{cases} \quad (6)$$

описываемыми в виде прямой, обратной и нулевой последовательности фаз как

$$i_+ = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} i_{mA} \cos(\omega t + \varphi_A) + \\ + i_{mB} \cos(\omega t + \varphi_B) + \\ + i_{mC} \cos(\omega t + \varphi_C) \end{pmatrix}, \\ i_- = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} i_{mA} \cos(\omega t + \varphi_A) + \\ + i_{mB} \cos(\omega t + 120^\circ + \varphi_B) + \\ + i_{mC} \cos(\omega t - 120^\circ + \varphi_C) \end{pmatrix}, \\ i_0 = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} i_{mA} \cos(\omega t + \varphi_A) + \\ + i_{mB} \cos(\omega t - 120^\circ + \varphi_B) + \\ + i_{mC} \cos(\omega t + 120^\circ + \varphi_C) \end{pmatrix}.$$

В итоге, после выполнения необходимых математических преобразований с использованием тригонометрической формулы

разложения косинуса с аргументом в виде суммы (разности) двух углов систему уравнений (6) можно представить как

$$i_+ = i_m^+ \cos(\omega t + \varphi_+) = A_1^+ \cos \omega t - A_2^+ \sin \omega t, \quad (7)$$

$$i_- = i_m^- \cos(\omega t + \varphi_-) = A_1^- \cos \omega t - A_2^- \sin \omega t, \quad (8)$$

$$i_0 = i_m^0 \cos(\omega t + \varphi_0) = A_1^0 \cos \omega t - A_2^0 \sin \omega t, \quad (9)$$

где $A_1^+, A_1^-, A_1^0, A_2^+, A_2^-, A_2^0$ – амплитуды гармонических составляющих в функции угловой частоты ω

$$A_1^+ = \frac{1}{3}(i_{mA} \cos \varphi_A + a),$$

$$A_2^+ = \frac{1}{3}(i_{mA} \sin \varphi_A + b),$$

$$A_1^- = \frac{1}{3}\left(3A_1^+ - \frac{3}{2}a + \frac{\sqrt{3}}{2}b - \sqrt{3}i_{mC} \sin \varphi_B\right),$$

$$A_2^- = \frac{1}{3}\left(3A_2^+ - \frac{3}{2}b + \frac{\sqrt{3}}{2}a - \sqrt{3}i_{mC} \cos \varphi_C\right),$$

$$A_1^0 = \frac{1}{3}\left(3A_1^+ - \frac{3}{2}a + \frac{\sqrt{3}}{2}b - \sqrt{3}i_{mC} \sin \varphi_C\right),$$

$$A_2^0 = \frac{1}{3}\left(3A_2^+ - \frac{3}{2}b + \frac{\sqrt{3}}{2}a - \sqrt{3}i_{mC} \cos \varphi_B\right),$$

здесь a, b – вспомогательные функции, определяемые как

$$a = i_{mB} \cos \varphi_B + i_{mC} \cos \varphi_C,$$

$$b = i_{mB} \sin \varphi_B + i_{mC} \sin \varphi_C,$$

которые связаны с максимальными мгновенными значениями i_m^+, i_m^-, i_m^0 и угловыми сдвигами $\varphi_+, \varphi_-, \varphi_0$ на основании следующих зависимостей

$$i_m^+ = \sqrt{A_1^+ + A_2^+}, i_m^- = \sqrt{A_1^- + A_2^-},$$

$$i_m^0 = \sqrt{A_1^0 + A_2^0},$$

$$\varphi_+ = \arccos \frac{A_1^+}{i_m^+} = \arcsin \frac{A_2^+}{i_m^+},$$

$$\varphi_- = \arccos \frac{A_1^-}{i_m^-} = \arcsin \frac{A_2^-}{i_m^-},$$

$$\varphi_0 = \arccos \frac{A_1^0}{i_m^0} = \arcsin \frac{A_2^0}{i_m^0}.$$

Воспользовавшись формулами (2)–(9), скалярная часть кватерниона мгновенной мощности определяется в соответствии с равенством

$$\text{scal} \mathbf{P}_{ABC} = -\frac{3}{2}u_m(i_m^+ \cos \varphi_+ + i_m^- \cos(2\omega t + \varphi_-)),$$

а вещественные коэффициенты перед мнимыми единицами $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3$ преобразовываются к виду

$$q_A = \frac{\sqrt{3}}{2}u_m \begin{pmatrix} i_m^+ \sin \varphi_+ - i_m^0 \sin \varphi_0 + \\ + i_m^0 \sin(2\omega t + \varphi_0) - \\ - i_m^- \sin(2\omega t + \varphi_-) \end{pmatrix},$$

$$q_B = \frac{\sqrt{3}}{2}u_m \begin{pmatrix} i_m^+ \sin \varphi_+ - i_m^0 \sin(60^\circ - \varphi_0) - \\ - i_m^- \sin(2\omega t + \varphi_-) - \\ - i_m^0 \sin(2\omega t + \varphi_0 + 60^\circ) \end{pmatrix},$$

$$q_C = \frac{\sqrt{3}}{2}u_m \begin{pmatrix} i_m^+ \sin \varphi_+ + i_m^0 \sin(\varphi_0 + 60^\circ) - \\ - i_m^- \sin(2\omega t + \varphi_-) - \\ - i_m^0 \sin(2\omega t + \varphi_0 - 60^\circ) \end{pmatrix}.$$

СИММЕТРИЧНАЯ ЛИНЕЙНАЯ НАГРУЗКА

Так, например, в частном случае, при симметричной линейной активно-реактивной нагрузке с $i_{mA} = i_{mB} = i_{mC} = i_m$ и $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi$, применительно к которой справедливо [10]

$$i_+ = i_m \cos(\omega t + \varphi), i_- = i_0 = 0,$$

получаем следующие расчетные соотношения [4]

$$\text{scal} \mathbf{P}_{ABC} = -\frac{3}{2}u_m i_m^+ \cos \varphi_+ = -\frac{3}{2}u_m i_m \cos \varphi,$$

$$q_A = q_B = q_C = -\frac{\sqrt{3}}{2}u_m i_m^+ \sin \varphi_+ = \frac{\sqrt{3}}{2}u_m i_m \sin \varphi,$$

которые в случае $\varphi = 0$ вырождаются в равенства

$$\text{scal} \mathbf{P}_{ABC} = -\frac{3}{2}u_m i_m = \text{const}, \text{vect} \mathbf{P}_{ABC} = 0.$$

Как видно из последних формул, асимметрия токов вызывает появление $\text{vect} \mathbf{P}_{ABC}$, отвечающей за потоки электрической энергии в единицу времени, которые не потребляются от источника и циркулируют между фазами системы [10]. При этом вещественные коэффициенты скалярной и векторной частей \mathbf{P}_{ABC} содержат

среднюю составляющую, относительно которой происходит гармоническое колебание с удвоенной частотой.

В заключение также необходимо отметить, что представленные выше результаты можно обобщить на случай нелинейной нагрузки путем совместного анализа всех членов правой части (1) после разложения токов и напряжений в ряд Фурье [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании представленных в данном докладе теоретических результатов аналитического исследования уравнения баланса мгновенных мощностей несимметричной активно-реактивной нагрузки, которое выполнено в рамках некоммутативных правил произведения четырехмерных гиперкомплексных чисел, можно сделать следующие выводы:

1. Кватернионный подход, в отличие от классических методов расчета линейных электрических цепей переменного тока, позволяет выполнять анализ режимов работы трехфазных систем произвольного вида по мгновенным значениям, а не по среднеквадратичным величинам в установившемся процессе.

2. Практическое использование гиперкомплексных чисел позволяет описать процесс энергопотребления в рамках единого математического аппарата без привлечения, например, элементов аналитической геометрии или матричного исчисления, что в конечном итоге позволяет устранить ряд теоретических противоречий современных теорий мгновенной мощности, вызванных, например, отсутствием строго определения векторного произведения применительно к матрицам-столбцам [9].

3. Разделение уравнения баланса мгновенных мощностей (1) на вещественную и мнимую части дает наглядную интерпретацию потоков электрической энергии в единицу времени, выделяя в них “полезную” и неэффективную (компенсируемую) составляющие.

4. Наличие реактивных элементов вызывает появление постоянного смещения в $\text{vec}\mathbf{P}_{ABC}$, которое является аналогом классической реактивной мощности сдвига при переходе к действующим значениям и непосредственно определяется из результата произведения кватернионов без дополнительного интегрирования квадратичных зависимостей переменных.

5. При параметрической асимметрии цепей в скалярной и векторной частях \mathbf{P}_{ABC} одновременно возникают гармонические колебания, которые изменяются с удвоенной частотой питающего напряжения.

6. При питании нагрузки с изолированной средней точкой от источника с симметричной системой напряжений (4), вещественные коэффициенты векторной части кватерниона мгновенной мощности равны друг другу, в результате чего представляется возможным описать во времени энергетические процессы при помощи только скалярных величин и таким образом существенно упростить процедуры анализа и синтеза трехфазных систем переменного тока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. IEEE Press. Published by John Wiley & Sons, Inc, 2007. 379 p.
2. Шалыгин К. А., Нос О. В. Активные силовые фильтры в задачах повышения качества электрической энергии // Научный вестник НГТУ. 2013. № 4 (53). С. 191–202.
3. Розанов Ю. К., Рябчицкий М. В., Кваснюк А. А. Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники // Электротехника. 1999. № 4. С. 28–32.
4. Нос О. В., Панкратов В. В. Анализ трехфазных систем компенсации мгновенной неэффективной мощности в кватернионном базисе // Изв. вузов. Электромеханика. 2013. № 6. С. 3–8.
5. Нос О. В., Харитонов С. А. Система управления силовыми токами компенсации мгновенной неэффективной мощности // Электротехника. 2015. № 2. С. 28–34.
6. Willems J. L. Mathematical foundations of the instantaneous power concepts: a geometrical approach // European Transactions on Electrical Power. 1996. Vol. 6, № 5. P. 299–3049.
7. Ustariz A. J., Cano E. A., Tacca H. E. Tensor analysis of the instantaneous power in electrical networks // Electric Power Systems Research. 2010. Vol. 80, № 7. P. 788–798.
8. Cristaldi L., Ferrero A. Mathematical foundations of the instantaneous power concepts: an algebraic approach // European Transactions on Electrical Power. 1996. Vol. 6, № 5. P. 305–309.
9. Нос О. В., Панкратов В. В. Алгоритм управления выходными токами активного силового фильтра с использованием гиперкомплексных чисел // Изв. вузов. Электромеханика. 2012. № 6. С. 33–39.
10. Нос О. В. Гармонический анализ кватерниона мгновенной мощности трехфазной нагрузки произвольного вида // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2015. № 1 (26). С. 75–84.
11. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1967. 776 с.